

# 超高速デジタル式ビデオカメラを用いた画像解析手法の開発 - 亀裂進展問題への適用の試み -

Development of Image Analysis Method with Ultra-High Speed Digital Video Camera  
- Application to the Crack Propagation Problem -

沖中知雄\*・江藤剛治\*\*  
Tomoo OKINAKA and T.Goji ETOH

\*正会員 Ph.D. 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

\*\*正会員 工博 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

The object of this research is to develop an accurate particle detection method for image analysis. Image analysis with in-situ storage image sensor (ISIS) camera is expected to be a powerful tool for finite deformation problem of continuum medium under high-strain rate. Accurate particle detection is of importance in this application, since the accuracy of detected strain strongly depends on that of particle detection. Tracking of Gaussian particle is combined with the size and configuration of photo diodes on ISIS. Then, the problem of particle detection is successfully reduced to the optimization problem with three variables. The proposed method results in the accuracy of 0.011 pixel according to the numerical simulation.

Finally, the image analysis with proposed method is applied to the crack propagation problem under the impact loading. Strain concentration preceding the crack propagation is obtained through the image analysis.

**Key Words :** image analysis, PIV, PTV, ISIS, crack propagation

## 1. はじめに

岩盤、コンクリートなどの破壊過程におけるせん断帯の形成や亀裂の不安定成長と言った現象の解明は、地震時の強振動問題、構造物の破壊メカニズムを解明する上で重要である。これら面的、空間的に高速で進展する現象の解明にはデジタル式高速ビデオカメラを用いた画像解析が有効な手法である。高速ビデオカメラを用いることにより現象が面的に記録でき、現象の観察と計測が同時に行なえるためである。

固体中の亀裂進展など、 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$  s のオーダーで高速で進行する現象の解明に画像解析が適用された例は少ない。この理由として、画像解析の精度の問題とビデオカメラの撮影速度や画質の問題が挙げられる。従来型のフィルムを用いた銀塩式超高速カメラの場合、撮影速度が高く画質も良好であるため現象の記録には適している。しかし上書き撮影ができないため撮影タイミングの設定に熟練を要する、感度が低いため大規模な照明が必要となる、撮影された画像のデジタル化に労力を要する等の欠点があり、画像解析に適用することは困難である。一方デジタル式ビデオカメラでは、高解像度のカメラは撮影速度が低く、撮影速度の高いカメラは画質が劣る、撮影枚数が少ないなどの欠点があり、画像解析に適さなかった。

毎秒 100 万枚、連続 103 枚上書き撮影可能な画素周辺記録型撮像素子 (in-situ storage image sensor, 以下

ISIS) を搭載した超高速デジタル式ビデオカメラ (以下 ISIS カメラ) が江藤等によって開発された。<sup>1),2),3)</sup> ISIS カメラは  $1.0 \times 10^{-6}$  s 毎に画像を撮影することができ、画像解析に十分な画質を持つ超高速デジタル式ビデオカメラである。マイクロ・秒のオーダーで進行する現象の解明に寄与すると期待され、既にその応用例も報告されている。<sup>4),5),6)</sup>

ISIS カメラにより、デジタル式ビデオカメラの問題は一応の解決を見た。ISIS カメラの改良を含め、今後この分野のビデオカメラの高性能化が期待される。高性能化による撮影速度や画素数の向上、撮影枚数の増大などに伴い、せん断帯の形成、不安定成長中の亀裂の評価など、力学分野への応用の幅も広がると期待される。

このような力学分野への応用を考慮した際、残る課題は画像解析手法の精度の向上である。力学分野で画像解析を使用するためには、最低でも数  $100\mu$  程度のひずみの検出精度が要求される。画像解析によりこのオーダーでひずみが検出できれば、超高速デジタル式ビデオカメラにより記録された現象を解析し、詳細かつ定量的な検討を加えることが可能となる。

本研究では、高精度な画像解析手法の確立を目標とし、そのための基礎的な研究を行なった。ガウス粒子を用いた粒子追跡法と撮像素子上での光電変換部の形状と位置の情報を組み合わせることにより、粒子の検

出精度の改善を試みる。次に開発された画像解析手法を石膏供試体の衝撃破壊に適用し、提案された手法の精度を検証すると共に、亀裂進展時の変位場、ひずみ場について検討を加える。

## 2. 画像解析

### 2.1 画像解析の概要

デジタル式カメラによる画像の撮影では、撮影対象は光学系を介して撮像素子上に結像する。撮像素子上では、各画素が光電変換部と呼ばれる部位を持ち、ここで入射した光量に応じた電荷が発生する。発生した電荷の量が各画素の輝度として記録され、画像は各画素に記録された輝度の集合体となる。

画像解析は、各画素に記録された輝度の集合体である画像の中から粒子や局所的領域を参照点として抽出し、時系列に沿って撮影された2枚以上の画像を比較することにより変位を求める解析手法である。変位を2枚の画像の撮影時間間隔で除することにより変位速度が求まり、また複数の参照点の相対変位とその間隔からひずみが得られる。得られた変位速度の精度は参照点の変位の精度に、ひずみの精度は参照点の変位の精度とその間隔に依存するため、画像解析の精度は撮影された画像の解像度、画質、カメラの撮影速度、参照点の検出精度などに依存する。

各画素の輝度の集合である画像から速度分布を求める手法は、Particle Image Velocimetry(以下 PIV) と総称される。PIV は参照点の検出、変位ベクトルの決定、速度場の決定の3つの手順から成り立つが、本研究では参照点の検出にのみ着目する。画像解析の固体の変形への適用を考慮した場合、撮影対象の変形が小さく変位ベクトル決定時に誤差が含まれることが少ないためである。参照点の検出は、対象の設定方法により

- 画像相関法
- 粒子追跡法

に大別される。図-1に、両者の概念図を示す。

画像相関法は、撮影された画像から切り抜いた局所的な領域の輝度分布を求め、この輝度分布と相関の高い領域を追跡することにより領域の平均変位を決定する手法である。撮影対象に特殊な処理を施す必要が無い場合適用が比較的容易である。検出精度をサブピクセル単位まで高めたサブ・ピクセル法、対象領域の変形、回転を考慮しサブ・ピクセル法と組み合わせた手法など多くの手法が提案されている。<sup>7),8),9)</sup>

粒子追跡法は画像中の粒子に着目し、その変位を追跡する手法である。流体を対象とする場合には流体中に混入されたトレーサ粒子を、固体を対象とする場合には物体表面に施したマークを追跡する。理想的なガウス分布を持つ粒子像をテンプレートとして用意し、撮影画像との相関から粒子を検出する粒子マスク相関

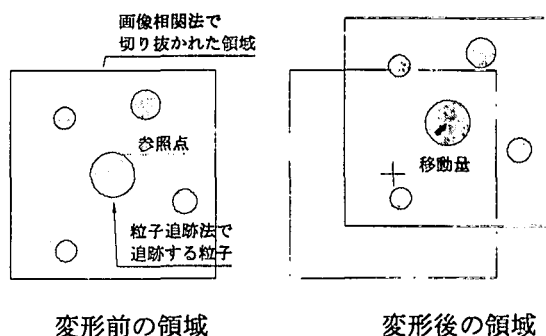


図-1 PIVによる変位検出の概念図

法が代表的な手法として挙げられる。<sup>10)</sup>

参照点の検出精度を数値シミュレーションを用いて検証する手法としてVSJ-PIV標準画像を用いる方法が一般的である。VSJ-PIV標準画像とは筒数、位置、粒子径などが既知のガウス粒子を含む画像である。この画像から粒子を検出することにより検出手法の精度を検証する目的で可視化情報学会PIV標準化・実用化委員会により公開されている。この手法を用いて検証した各手法の検出精度は、サブ・ピクセル法で約0.3画素、粒子マスク相関法で約0.13画素となっている。<sup>11)</sup> 実験により撮影された画像には、光学系のひずみ、ノイズ、光電変換部の感度特性などの誤差要因が含まれる。このため実験に適用した際の検出精度は低下し、粒子マスク相関法の場合で0.2画素程度になると言われている。

### 2.2 画像解析によるひずみ検出精度

力学問題に画像解析を適用した場合、変位のみでなくひずみが問題となるケースが多い。単純化のために1次元のひずみを考慮すると、

$$\text{ひずみの検出精度} = \frac{\text{粒子の検出精度}}{\text{粒子間の距離}}$$

として与えられる。従ってひずみの検出精度を向上させるためには粒子の検出精度を改善するか、粒子間の距離を大きくする必要がある。ただし、ここで示された粒子間の距離は、供試体表面に施されたマークの物理的距離ではないことに注意が必要である。画像解析では、画像撮影時に撮像素子上に結像した像を取扱うため、粒子間距離は撮像素子上での粒子の像の間の距離となり、単位は画素で表される。

静的、準静的な実験の画像解析に使用される低速のデジタル式ビデオカメラ、デジタル式スティールカメラは数100万の解像度を持つものが広く利用されており、特殊な用途に限れば1,000万画素クラスのものも

開発されている。従って粒子間の距離を大きくとることが可能であり、ひずみの検出精度を上げることができる。

一方超高速デジタル式ビデオカメラは解像度を高くすることが困難で、ISIS カメラでも画素数は81,120(312x260)画素に止まる。従って超高速ビデオカメラを用いてひずみを精度良く検出するためには、高精度な粒子の検出が必要となる。

### 2.3 高精度粒子検出手法

本研究では、ガウス粒子を用いた粒子追跡法と撮像素子上での光電変換部の形状と位置の情報を組み合わせることにより、高精度な粒子検出手法の開発を試みた。粒子を撮影した際、画素で記録される輝度は撮像素子上での粒子の像と光電変換部の相対的な位置関係に依存している。ISIS は科学計測用に設計されているため、撮像素子上の光電変換部の形状と配置が既知である。そこでこれらの情報を組み合わせることにより、粒子検出精度の改善を試みるものである。ここでガウス粒子とは、濃度が粒子中心からの距離にガウス分布で従う円形粒子のことである。

ISIS カメラによる粒子画像の撮影時に ISIS 上に結像する粒子の像と、光電変換部との関係を図-2に示す。ISIS 上には81,120個(312x260)の光電変換部が規則的に配置されている。粒子像の濃度  $f(r, \sigma)$  はガウス分布に従うため、次式で与えられる：

$$f(r, \sigma) = \frac{F_0}{2\pi\sigma^2} \text{Exp} \left[ -\frac{|r|^2}{2\sigma^2} \right].$$

ここで、 $r$  は粒子中心から対象点へのベクトル、 $\sigma$  は濃度分布の標準偏差、 $F_0$  は濃度高さを規定する定数である。

粒子の像の映り込む複数の光電変換部のうち、粒子像の中心位置から  $r_0 = (x_0, y_0)$  の位置にある光電変

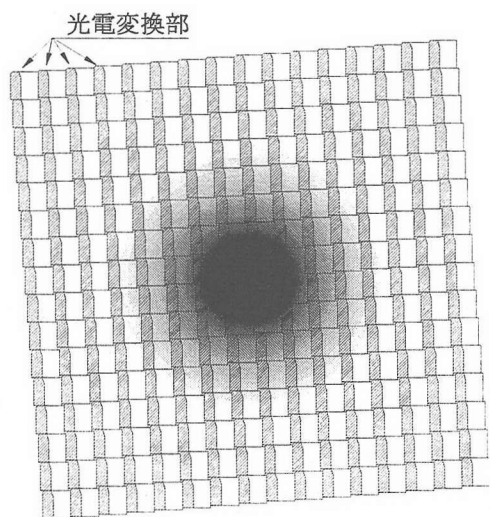


図-2 ISIS 上に結像する粒子の像

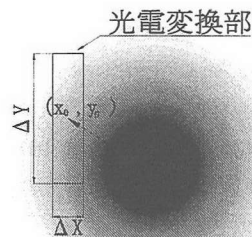


図-3 粒子の像と光電変換部の相対位置

換部と粒子像の位置関係を図-3に示す。光電変換部の形状を幅  $\Delta X$ 、高さ  $\Delta Y$  の矩形としてモデル化している。この光電変換部で記録される輝度  $G(x_0, y_0, \sigma, F_0)$  はこの光電変換部全域での粒子の濃度の積分値となり、従って

$$G(x_0, y_0, \sigma, F_0) = \int_{x_0 - \Delta X/2}^{x_0 + \Delta X/2} \int_{y_0 - \Delta Y/2}^{y_0 + \Delta Y/2} f(x, y, \sigma) dy dx$$

$$= \frac{F_0}{4} \left[ \text{Erf} \left( \frac{x_0 + \Delta X/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left( \frac{x_0 - \Delta X/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$

$$\times \left[ \text{Erf} \left( \frac{y_0 + \Delta Y/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left( \frac{y_0 - \Delta Y/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]. \quad (1)$$

ここで  $\text{Erf}$  は誤差関数である。ここで示されたように粒子の影の映り込む画素に記録される輝度は粒子中心位置、濃度の標準偏差、濃度の高さの関数となる。

ISIS 上で粒子は複数の光電変換部に跨って像を形成し、光電変換部に対応する画素に輝度として記録される。従って粒子の中心位置を求める問題は、その粒子の像を記録した複数の画素の輝度に最適な解を与える粒子中心の X 座標、Y 座標、標準偏差  $\sigma$ 、濃度  $F_0$  を求める 4 変数の最適化問題として解くことができる。

粒子径が画素サイズと比較し十分に大きい場合、式 (1) を展開して次式が得られる：

$$G \approx \frac{F_0 \Delta X \Delta Y}{2\pi\sigma^2} \text{Exp} \left( -\frac{X_0^2}{2\sigma^2} \right) \text{Exp} \left( -\frac{Y_0^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2)$$

粒子の像を記録している画素をマスクとして切り抜くと、マスク中の輝度の最大値  $G_{max}$  は粒子中心近傍で得られる。 $\frac{X_0}{\sigma}, \frac{Y_0}{\sigma} \ll 1$  が満たされれば、式 (2) をさらに変形し、次式を得る：

$$G_{max} \approx \frac{F_0 \Delta X \Delta Y}{2\pi\sigma^2}. \quad (3)$$

式 (3) を式 (1) に代入することにより、次式を得る：

$$G = \frac{\pi\sigma^2 G_{max}}{2\Delta X \Delta Y}$$

$$\times \left[ \operatorname{Erf} \left( \frac{x_0 + \Delta X/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \operatorname{Erf} \left( \frac{x_0 - \Delta X/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \\ \times \left[ \operatorname{Erf} \left( \frac{y_0 + \Delta Y/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \operatorname{Erf} \left( \frac{y_0 - \Delta Y/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \cdot (4)$$

従って粒子の中心位置を求める問題は 3 変数  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $\sigma$  の最適化問題となる. 変数を減らすことにより, 計算の精度と効率の改善が期待できる.

### 2.4 高精度粒子検出手法の性能評価

提案された高精度粒子検出手法の精度を検証する目的で, 数値シミュレーションを行なった.

提案された粒子検出手法の数値シミュレーションには VSJ-PIV 標準画像の使用は適さない. これは提案されている検出手法が光電変換部の形状と位置が既知である撮像素子に記録された画像からの粒子検出だからである. そこで, ISIS と同じサイズの光電変換部を 10,000 個 (100×100) 持つ仮想の撮像素子を設定し, この仮想撮像素子上のランダムな位置にガウス粒子を発生させて試験画像として用いた. 検出された粒子中心位置と, 発生させたガウス粒子の中心位置の差を検出誤差として定義する. また発生させた粒子には, 標準偏差として 2～5 画素の値をランダムに与えた.

2,000 個の粒子について検討した結果を図-4 に示す. 粒子の検出誤差の最大値は 0.011 画素となっており, 既往の検出手法と比較し精度が大幅に改善されている. 実験では, 光電変換部を矩形とモデル化したことによって生じる誤差, 光電変換部の感度特性, 光学系のひずみ, 暗電流の影響などが含まれるため, 検出精度は低下する. しかしながら, 実験に適用しても, 既往の手法と比較して精度の改善が期待できる.

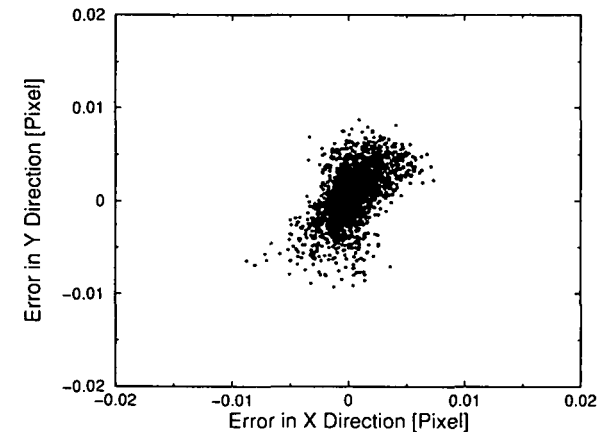


図-4 粒子検出誤差

表-1 硬石膏の物性

|       |                        |
|-------|------------------------|
| 密度    | 1.73 g/cm <sup>3</sup> |
| ヤング係数 | 9.2 GPa                |
| ポアソン比 | 0.26                   |
| 圧縮強度  | 11.2 MPa               |
| 曲げ強度  | 6.3 MPa                |
| 引張強度  | 1.5 MPa                |
| 引張伸び  | 124 μ                  |

## 3. 衝撃破壊試験への適用の試み

### 3.1 供試体概要

本研究では供試体の材料として硬石膏を採用し, 40×40×160 mm<sup>3</sup> の角柱供試体を作成した. 供試体は型打ち後 4 日間水中養生し, その後水から引きあげて 3 日間空中養生を行ない実験に供した.

硬石膏は工学的な材料では無いが, 供試体を作成しやすく, 容易に脆性破壊を引き起こす. そのため画像解析の予備実験の材料として採用したものである. また表面が平滑で加工し易いことも硬石膏を採用した理由として挙げられる.

画像解析を適用する目的で, 表面にマーキングを施した. 高精度画像解析手法を適用するためには, 供試体表面にガウス粒子をマーキングする必要がある. 本研究では写真現像の原理を応用し, ガウス粒子の焼き付けを行なった. 空中養生を終了した供試体表面にハロゲン化銀を含んだ感光剤を塗布, ガウス粒子を写真撮影したネガを現像の手順で焼き付けた. 作成された供試体を図-5 に示す. 供試体表面にガウス粒子がマーキングされている. 焼き付けに使用したネガを交換することにより, ガウス粒子のサイズ, 密度が変更できる. また, 粒子の濃度は現像時の露光時間により制御する.

表-2 使用した撮影条件

|        | ケース 1     | ケース 2                               |
|--------|-----------|-------------------------------------|
| 撮影速度   | 12.5 万枚/秒 | 10 万枚/秒                             |
| 撮影対象領域 | 供試体全域     | 供試体中央部<br>(約 4 × 4cm <sup>2</sup> ) |
| 使用レンズ  | Nikon85mm | Nikon85mm<br>接写レンズ付                 |
| 照明     | ハロゲンライト   | ハロゲンライト                             |
| トリガー   | 音声トリガー    | レーザートリガー                            |
| 画像解析   | ×         | ○                                   |

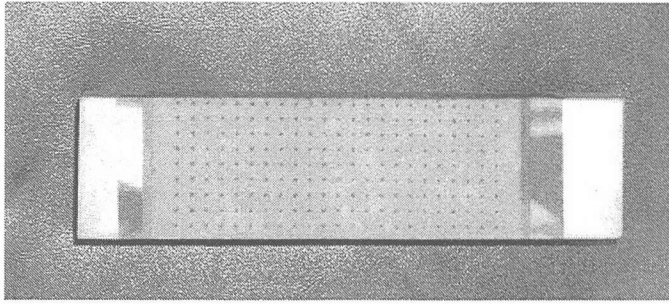


図-5 ガウス粒子を焼き付けた供試体

### 3.2 材料の物性

実験に使用した硬石膏の物性を調べる目的で物性試験を行なった。φ50 mm×100 mm の円柱供試体、40×40×160 mm<sup>3</sup> の角柱供試体、70×25×25 mm<sup>3</sup> のブリケット型供試体を作成し、各々を用いて圧縮試験、曲げ試験、割裂試験を行なった。試験により得られた硬石膏の物性を表-1 に示す。

### 3.3 衝撃破壊試験への適用

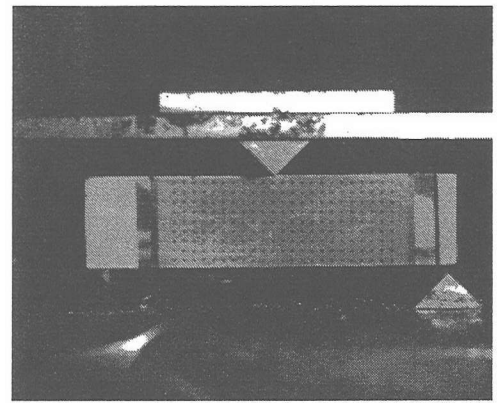
5.0kg の錘を 15cm の高さから落下させて角柱供試体に衝突させ、7.35J のエネルギーを与えることにより 3 点曲げ衝撃破壊試験を行なった。ISIS カメラによる撮影は、2 通り撮影条件で行なった。使用した撮影条件を表-2 に示す。

ケース 1 の撮影結果を図-6 に示す。8μs 毎に撮影された 103 枚の画像から、120 秒毎に 3 枚の画像を抜きだしている。312μs で供試体下側の中央部に亀裂が発生する。この亀裂の発生部分した供試体中央部を拡大したものを図-7 に示す。発生後、亀裂は上方向に進展し、供試体の破断に到る。

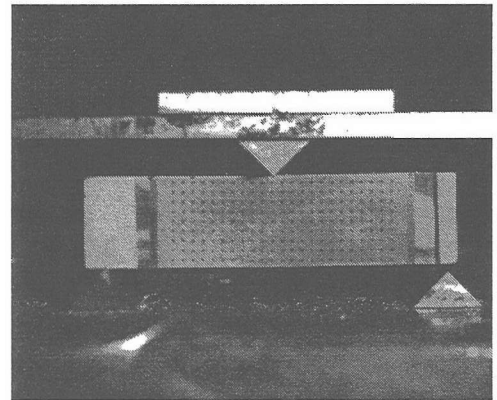
ケース 1 の撮影画像に画像解析を適用することはできなかった。これは、ケース 1 の撮影画像では各々のガウス粒子を記録している画素が 4~9 画素と少なく、最適化を適用して得られた解の精度が低かったためである。そこでケース 2 では、ISIS カメラに接写レンズを装着し亀裂の発生する供試体中央部を拡大して撮影することを試みた。

ケース 2 の撮影結果のうち、670μs ~ 690μs の撮影結果を図-8 に、700μs ~ 720μs の撮影結果を図-9 に示す。図-9(a) で、供試体下縁中央部での微小な亀裂の発生が確認された。亀裂は時間と共に供試体上部方向に進展し、20μs 後の図-9(c) では明確に確認できるサイズに成長している。800μs での撮影結果を図-10 に示す。供試体下縁中央部から上部方向に進展した亀裂が供試体上縁に達し、供試体の破断に到っている。

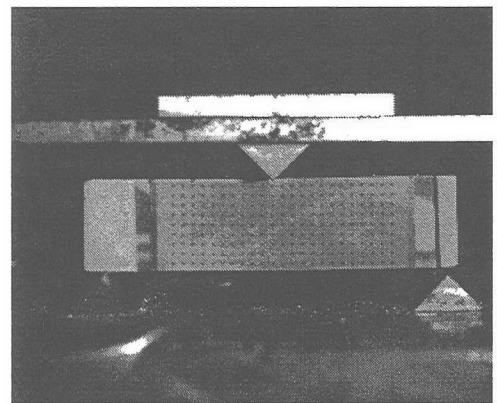
ここで、ケース 1 とケース 2 で亀裂の発生時刻が大きく異なっている理由であるが、これは ISIS カメラの時間原点の取り方によるものである。ISIS カメラでは、トリガーにより撮影を終了した時点で記憶領域に保存



(a)  $t=192\mu s$



(b)  $t=312\mu s$



(c)  $t=432\mu s$

図-6 ケース 1 の実験結果 (12.5 万枚/秒)

されている 103 枚の画像のうち、1 枚目の画像を  $t=0$  とする。そのため、トリガーのタイミングにより亀裂の発生時刻が見掛け上異なって求められているためである。



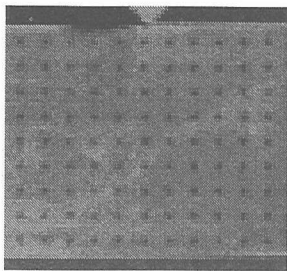


図-7  $t=312\mu s$  での供試体中央部の拡大図

### 3.4 画像解析による変位の検出

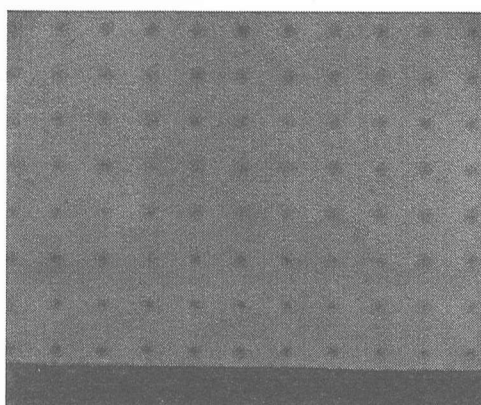
提案された高精度粒子検出法を適用して供試体表面にマークされたガウス粒子を追跡し、各粒子の変位を求めた。結果を図-11に示す。図中の長さの単位は画素である。変位を求めるためには変形前の各粒子の位置が必要となるが、衝撃破壊試験装置に供試体を設置した段階で ISIS カメラによる撮影を行ない、初期位置として利用している。亀裂の進展後、図-11(c)では亀裂に沿った粒子の動きが見られるが、亀裂発生時点の  $\pm 20\mu s$  である図-11(a),(b)では変位ベクトルの大きさ以外、目立った変化は見られない。

### 3.5 画像解析によるひずみの検出

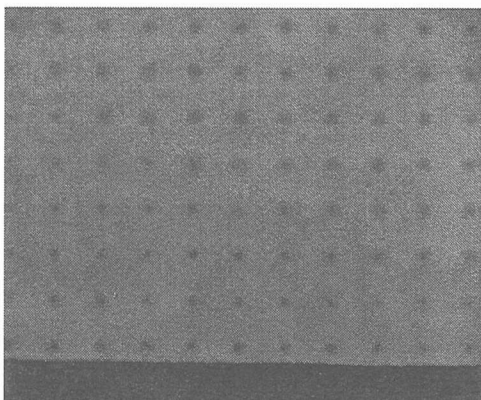
検出された変位からひずみを求めることを試みた。図-12に示すように、3個の粒子を  $x,y$  方向一つ置きに抽出し3角形要素を作成、要素内部のひずみを計算する手法で供試体表面のひずみ場を決定した。得られた  $x$  方向ひずみ  $\epsilon_{xx}$  のうち  $670\mu s \sim 690\mu s$  のひずみ分布を図-13に、 $700\mu s \sim 710\mu s$  のひずみ分布を図-14に示す。

図-13(a)は  $680\mu s$  でのひずみ分布である。供試体上縁部にひずみの集中が観測され、この部分のひずみは0.2%の大きさを持っている。 $10\mu s$  後の図-13(b)では、新たに供試体下縁部でもひずみの集中が観測され、この部分のひずみの大きさも0.2%であった。この時間の撮影結果(図-8(c))では供試体下縁部での亀裂の発生は確認されていない。図-13(c)、図-14(a)~(c)に示されたひずみ分布では、供試体上縁部におけるひずみの集中は時間の経過による変化を示さない。これに対し、供試体下縁部で発生したひずみの集中は、時間に伴って供試体高さ方向に拡大し供試体上縁部に達する。図-8、図-9に示された亀裂の発生と進展の撮影結果を図-13、図-14に示されたひずみ分布の画像と比較すると、供試体下縁部でのひずみ集中の発生地点とその拡大していく領域が亀裂が発生・進展していく領域と一致していることが分かる。

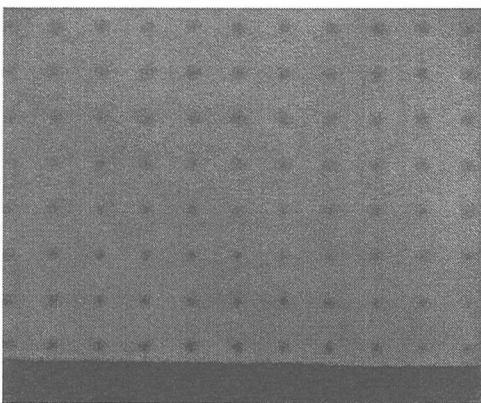
今回の実験で使用された画像解析の精度は定量的な評価に十分とは言い難く、解析結果の評価は定性的な評価に留まる。しかしながら、画像解析によりひずみ集中の発生と拡大が確認された領域と、亀裂の発生・進展領域が完全に一致しており、観測されたひずみ集中



(a)  $t=670\mu s$



(b)  $t=680\mu s$

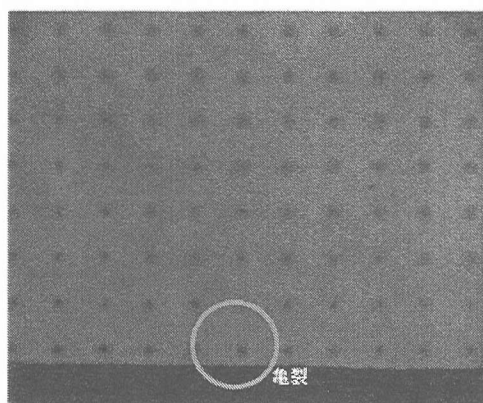


(c)  $t=690\mu s$

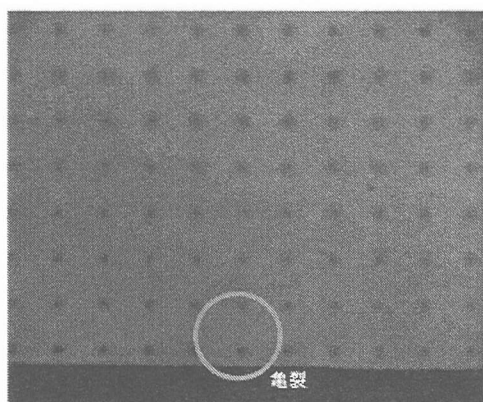
図-8 ケース 2:  $670\mu s \sim 690\mu s$  の結果 (10 万枚/秒)

が亀裂の発生と進展に起因すると結論付けることが合理的である。

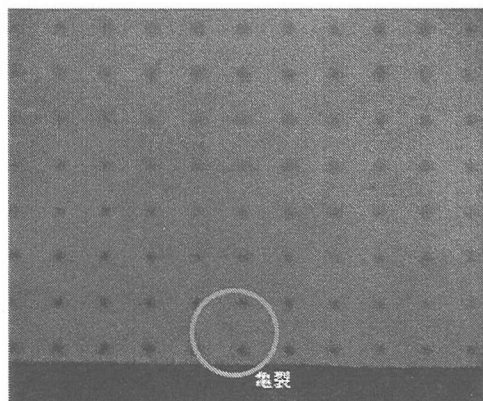
亀裂進展後、亀裂両側の面では応力が解放され従ってひずみ集中も緩和されるが、図 15 ではそのような領域は見当たらない。これはひずみの検出に使用した3角形要素が  $x,y$  方向一つ置きに抽出した3個の粒子に



(a)  $t=700\mu s$



(b)  $t=710\mu s$



(c)  $t=720\mu s$

図-9 ケース 2:  $700\mu s \sim 710\mu s$  の結果 (10 万枚/秒)

より形成されているためである。亀裂を跨ぐ形で要素を構成しているため、亀裂の開口後も見掛け上要素内のひずみが増加する結果を示している。この点の補整は、今後の課題である。

一方、供試体上縁部で観測されたひずみ集中は時間による変化を示しておらず、画像解析で用いられた粒子

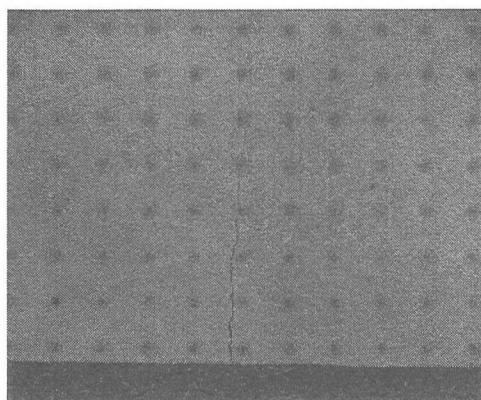


図-10 ケース 2:  $800\mu s$  での亀裂進展状況

検出手法の誤差に起因するものと考えられる。図-13(b)の時点で上縁部と下縁部のひずみ集中が同じ 0.2% の値を示していたことから、この値が今回用いられた画像解析手法のひずみ検出精度であると判断した。

画像解析により観測されたひずみの集中領域は、亀裂前方で形成される応力集中の領域とみるには大き過ぎる。このような現象が発生する原因として、

- 画像からは確認できない微細な欠陥の発生
- 画像に映っていない領域 (裏側) での破壊の進行
- ひずみ検出に使用した 3 角形要素の大きさの影響

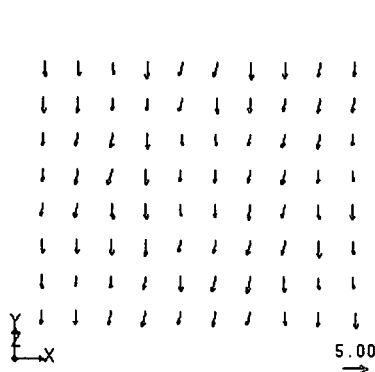
などの原因が考えられるが詳細については今後の検討が必要である。検討の手法として、数値解析による検証、複数のカメラの利用による多方向からの撮影などの方法を計画している。

### 3.6 画像精度の検証

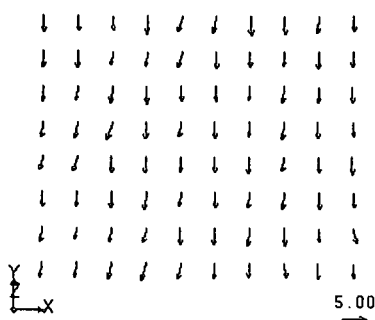
前節で示した通り、今回の画像解析でのひずみの検出感度は 0.2% であった。実験ではガウス粒子間の距離は約 35 画素であるが、粒子の抽出法により 2 粒子分の距離をとっているため 70 画素が参照長さとなる。従って本研究で開発された高精度粒子検出手法の実用上の精度は 0.14 画素となっている。

ひずみの検出に、隣接する 3 個の粒子により 3 角形要素を作成、要素内部のひずみを算定する手法も検討した。690  $\mu s$  で供試体下縁のひずみ集中部で検出されたひずみは 0.4% であった。この要素を用いたケースでは参照長さが粒子間の距離 35 画素となるため、粒子の検出精度は 0.14 画素である。これは、2 粒子分の参照長さをとったケースで得られた検出精度と一致している。従って、今回の画像解析では 0.14 画素が粒子の検出精度であると結論付けた。

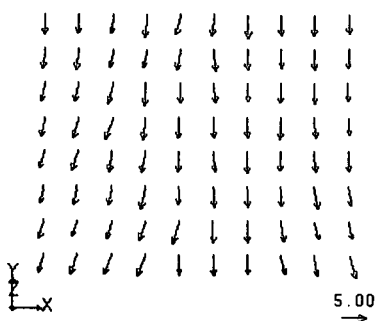
0.14 画素の精度は粒子マスク相関法の実用上の精度 0.2 画素と比較して 30% 改善されているが、数値シミュレーションによって得られた 0.011 画素の精度と比較して大きく低下している。これは、粒子の検出に各画素の輝度を直接用いた最適化を行なっているため、粒



(a)  $t=680\mu s$



(b)  $t=720\mu s$



(c)  $t=800\mu s$

図-11 画像解析により得られた変位場

子マスク相関法などの相関を利用してる手法と比較しノイズ、画素の感度特性といった誤差要因の影響を受け易くなっているためと考えられる。これらの誤差要因を低減する補整手法の開発が今後の課題と言える。

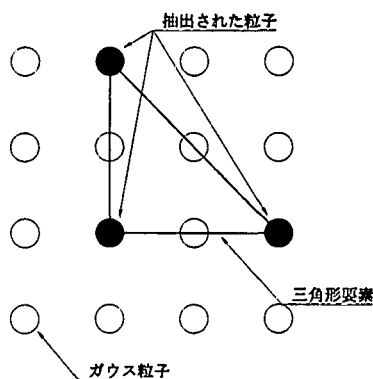


図-12 三角形要素の抽出

## 4. 結論

本研究では、画像解析のための高精度な粒子検出手法を開発した。撮像素子の画素に記録される輝度は、粒子の像と光電変換部との相対的な位置に依存する。ISISでは撮像素子上の光電変換部の位置、形状が既知であるため、撮像素子上に結像するガウス粒子の像と光電変換部の形状と位置の関係を組み合わせることにより、粒子の検出精度の改善を試みた。次に、開発された手法を石膏供試体の3点曲げ衝撃破壊試験に適用し、亀裂進展過程の検討を試みた。得られた結論は以下の通りである：

1. 撮像素子上に結像するガウス粒子の像と光電変換部の形状と位置の関係を組み合わせることにより、粒子検出精度の改善に成功した。数値シミュレーションでは、検出精度が0.011画素に抑えられた。
2. 石膏供試体表面にガウス粒子のマーキングを施す手法の開発に成功した。この粒子を追跡することにより、供試体表面での変位場、ひずみ場を決定することができた。
3. 亀裂が確認される直前に亀裂の発生点にひずみの集中していることが観測された。また、亀裂の進展に先立ち、ひずみの集中する領域が発生することが観測された。
4. 開発された粒子検出手法の実用上の精度は0.14画素程度であった。今後の課題として、素子の感度特性、ノイズなどの誤差要因の補整による精度の改善の必要性が確認された。

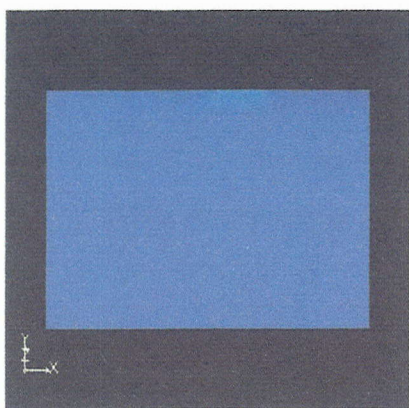
## 参考文献

- 1) T.G. Etoh et al.: "A CCD image sensor of 1 M frames/s for continuous image capturing of 103 frames", 2002 IEEE J. Solid-State Circuits, **45**, pp.46-47 (2002)
- 2) 江藤剛治, 武藤秀樹, 竹原幸生, 高野保英, 沖中知雄: "斜行直線 CCD 型画素周辺記録領域を持つ 100 万枚/秒の撮像素子", 映像学誌, **56** 3, pp.483-486 (2002)
- 3) T.G. Etoh et al.: "An image sensor which captures

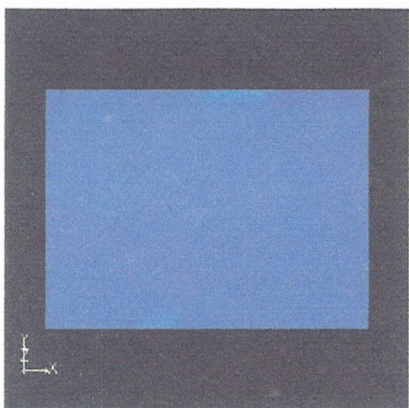


- 100 consecutive frames at 1,000,000 frames per second", IEEE Transaction on Electron Device (in press)
- 4) 竹原幸生, 沖中知雄, 高野保英, 井田民夫, 湊端学, 江藤剛治: "100 万枚/秒のビデオカメラの適用例と課題", 高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム 2001 講演論文集, pp.105-112 (2001)
  - 5) K. Takehara *et al.*: "Applications of a video camera of 1Mfps for water surface phenomena", Proc. of the 25<sup>th</sup> ICHSPP (2002)
  - 6) S.T. Thoroddesen *et al.*: "Air entrapment under an impact drop", (in press)
  - 7) A. Fincham and G. Delerce: "Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithm", Proc. 3rd Int. Workshop on PIV, additional print, 1999
  - 8) B. Lecordier *et al.*: "Iterative sub-pixel algorithm for the cross-correlation PIV measurements", Proc. 3rd Int. Workshop on PIV, 37-43, 1999
  - 9) 吉田純司, 阿部雅人, C.S. Lewangamage, 藤野陽三: "画像解析を利用した連続体の変形場の計測法", 土木学会論文集, No.710/I-60, PP.165-179, 2002
  - 10) 竹原幸生, 江藤剛治, 道典康治, 久野悟志: "粒子マスク相関法の性能評価", 可視化情報, Vol.17, pp117-120, 1997
  - 11) 可視化情報学会編: "PIV ハンドブック", 森北出版株式会社 (2002)

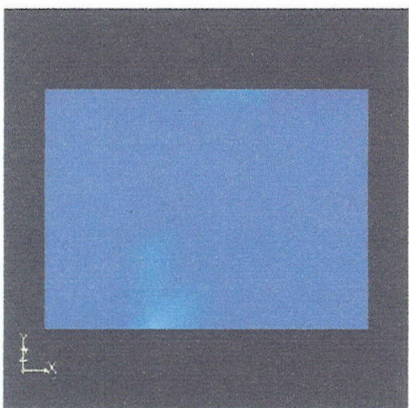
(2003 年 4 月 18 日 受付)



(a)  $t=680\mu s$

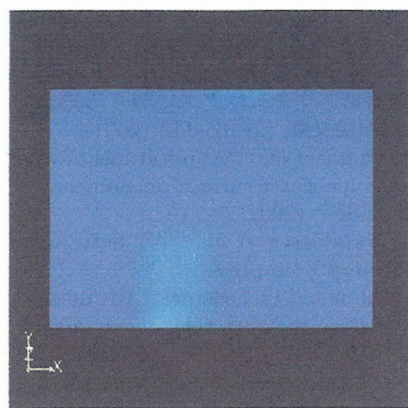


(b)  $t=690\mu s$



(c)  $t=700\mu s$

図-14 画像解析により得られたひずみ場  $680\mu s \sim 700\mu s$



(a)  $t=710\mu s$



(b)  $t=720\mu s$



(c)  $t=730\mu s$

図-15 画像解析により得られたひずみ場  $710\mu s \sim 720\mu s$